

УДК 536.212.2

В.М. Фокин, В.И. Лепилов

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ПРИ НАГРЕВЕ СИСТЕМ С МНОГОСЛОЙНЫМ ЭКРАНИРОВАНИЕМ

Представлено математическое исследование эффективной теплопроводности тел и времени температурного проникновения, в зависимости от количества экранов.

The paper presents a mathematics research of the efficient thermal conductivity of bodies as well as the time of the thermal diffusion dependent on the number of screens.

В ряде теплотехнических задач возникает необходимость в защите материалов и изделий от воздействия высоких температур. Практически требуется замедление теплового потока к охраняемому телу, с целью экономии времени [4].

На скорость проникновения теплоты оказывают влияние три основных теплофизических параметра: коэффициент теплопроводности, температуропроводность и объемная теплоемкость вещества. В нестационарных процессах нагрева или охлаждения тел чаще всего используется температуропроводность вещества, характеризующая скорость выравнивания температуры по объему тела. Для математического эксперимента предлагается конструкция, состоящая из n -го количества пластин нержавеющей стали и воздушных прослоек между ними [1], схема которой приведена на рис. 1.

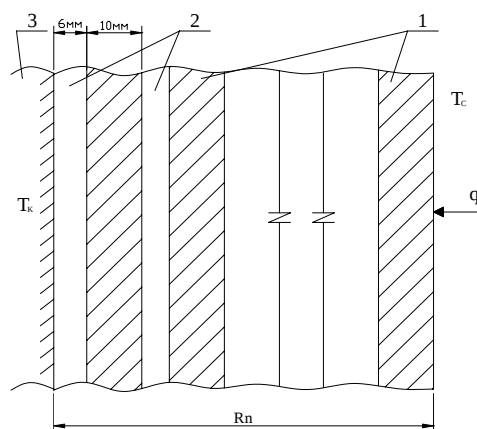


Рис. 1. Схема экранирования тел: T_c — температура внешнего источника теплоты; T_k — температура охраняемого образца; q — плотность теплового потока, Вт/м²; R_n — толщина пакета экранов, м; 1 — экраны из нержавеющей стали; 2 — воздушные прослойки; 3 — охраняемый образец (тело)

Для математического расчета времени температурного проникновения через экраны принимаются некоторые начальные условия: семь экранов из нержавеющей стали, покрытых электролитической медью, и семь воздушных прослоек.

В качестве первого приближения воспользуемся экспоненциальным распределением температурного поля:

$$T = T_C \cdot e^{-k(R-x)}, \quad (1)$$

где $T = 50^\circ\text{C}$ — предельное (контрольное) значение температуры на поверхности охраняемого образца; (при $x = 0$); $T_C = 1000^\circ\text{C}$ — температура поверхности первого слоя, со стороны источника теплоты; $R = 0,112\text{ м}$ — толщина пакета экранов; X — текущая координата, м; K — коэффициент.

Распределение температурного поля (1) имеет место до области регулярного режима, наступающего после начального периода нагрева. Известно [2], что между соседними экранами, разделенными прослойкой воздуха $\delta_{\text{воз}} = 0,006\text{ м}$, отсутствует конвекция. Теплота передается путем кондуктивной теплопроводности и за счет лучистого теплообмена между поверхностями экранов, а удельный тепловой поток определяется по формуле

$$q = \frac{\lambda_{\text{воз}}}{\delta_{\text{воз}}} \cdot (T_1 - T_2) + \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

где $\lambda_{\text{воз}}$ — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); T_1, T_2 — температура соседних экранов, К; q — плотность теплового потока, Вт/м²; $C_0 = 5,7\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε_n — приведенная степень черноты экранов.

Последнее выражение логично представить в виде

$$q = \left\{ \lambda_{\text{воз}} + \frac{\varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \delta_{\text{воз}}}{T_1 - T_2} \right\} \cdot \frac{T_1 - T_2}{\delta_{\text{воз}}} = (\lambda_{\text{воз}} + \lambda_{\text{луч}}) \cdot \frac{T_1 - T_2}{\delta_{\text{воз}}}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{луч}}$ — условный коэффициент лучистой теплопроводности, Вт/(м·К).

Условный коэффициент лучистой теплопроводности определяется из соотношения:

$$\lambda_{\text{луч}} = \frac{\varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \delta_{\text{воз}}}{T_1 - T_2}, \quad (3)$$

Если поверхность экранов покрыта слоем электролитической меди и отшлифована, то степень черноты поверхностей экранов будет: $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,02$, а приведенная степень черноты двух ближайших экранов составит [3]

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \approx 0,01, \quad (4)$$

При температурах, на соседних экранах, в средней части пакета $T_1 = 212$ и $T_2 = 181^\circ\text{C}$, рассчитанных по экспоненциальной зависимости (1), можем определить условный коэффициент лучистой теплопроводности:

$$\lambda_{\text{луч}} = \frac{0,01 \cdot 5,7 \cdot \left[\left(\frac{273+212}{100} \right)^4 - \left(\frac{273+181}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,006}{212-181} = 0,0014 \text{ Вт/(м} \times \text{К)}.$$

Эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$ системы входит в сумму термических сопротивлений:

$$\frac{R}{\lambda_{\text{эф}}} = n \frac{\delta_{\text{воз}}}{\lambda_{\text{воз}} + \lambda_{\text{луч}}} + n \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}},$$

где $\lambda_{\text{ст}}=26,68 \text{ Вт/(м} \times \text{К)}$ — коэффициент теплопроводности нержавеющей стали. Тогда имеем соотношение:

$$\frac{0,112}{\lambda_{\text{эф}}} = 7 \cdot \frac{0,006}{0,0255 + 0,0014} + 7 \cdot \frac{0,01}{26,68},$$

откуда $\lambda_{\text{эф}}=0,071 \text{ Вт/(м} \times \text{К)}$.

Эффективная объемная теплоемкость $(\text{ср})_{\text{эф}}$ всего пакета определяется на основе теплового баланса, с учетом объемных теплоемкостей воздуха $(\text{ср})_{\text{воз}}$ и стали $(\text{ср})_{\text{ст}}$ [3].

$$V_{\text{эф}}(\text{ср})_{\text{эф}} = V_{\text{воз}}(\text{ср})_{\text{воз}} + V_{\text{ст}}(\text{ср})_{\text{ст}}.$$

Тогда эффективная объемная теплоемкость будет равна:

$$(\text{ср})_{\text{эф}} = \frac{7 \cdot 0,006 \cdot (1,05 \cdot 1000) + 7 \cdot 0,01 \cdot (497 \cdot 7720)}{0,112} = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \times \text{К)}.$$

Эффективный коэффициент температуропроводности системы экранирования находится из соотношения

$$\alpha_{\text{эф}} = \frac{\lambda_{\text{ср}}}{(\text{ср})_{\text{эф}}} = \frac{0,071}{2,4 \cdot 10^6} = 2,96 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Для оценки температуры охраняемого тела при нагреве используем соотношение [2]

$$\theta_{\text{ц}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n} \cdot (-1)^{n+1} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot \text{Fo}},$$

где $\mu_n = (2n-1) \cdot \pi/2$ — характеристические числа; Fo — число Фурье.

Для рассматриваемой системы число Фурье

$$\text{Fo}=0, \theta_{\text{ц}}=1.$$

Значению $\theta_{\text{ц}}=0,95$ будет соответствовать $\text{Fo}=\text{Fo}_*$, равное 0,1 [2].

Тогда время нагрева системы, с, составит

$$\tau = \text{Fo} \cdot \frac{R_n^2}{\alpha_{\text{эф}}} = 0,1 \cdot \frac{0,112^2}{2,96 \cdot 10^{-8}} = 42378 \quad \text{или} \quad 11,77 \text{ ч}.$$

Соотношения безразмерных температур центра тела $\theta_{ц}$ и размерных температур имеет вид

$$\theta_{ц} = \frac{T_c - T_{ц}}{T_c - T_0},$$

где $T_c=1000$ °С — температура при граничных условий первого рода; $T_{ц}$ — температура центра тела, °С; $T_0=20$ °С — начальная температура центра тела.

Следовательно:

$$T_{ц} = T_c - \theta_{ц} \cdot (T_c - T_0) = 1000 - 0,95 \cdot (1000 - 20) = 69.$$

Аналогичные расчеты были выполнены так же для числа экранов $n = 5, 9, 11$. На рис. 2 приведены зависимости времени прогрева центра тела от количества экранов.

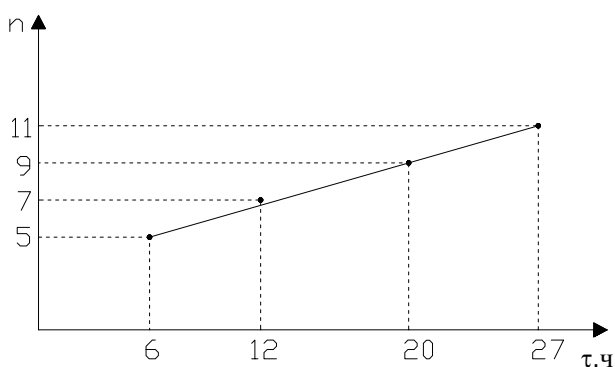


Рис. 2. График зависимости времени прогрева τ центра тела от количества экранов n

Данные для построения графика

№ точки	Количество экранов n	Время τ , ч
1	5	5,96
2	7	11,77
3	9	19,33
4	11	27,57

Таким образом, предлагаемая система многослойного экранирования показывает ее эффективную способность к защите охраняемых тел от воздействия высоких температур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковалевский В.И. Методы теплового расчета экранной изоляции / В.И. Ковалевский, Г.П. Бойков. М. : Энергия, 1974. 199 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. ГИТТЛ. М., 1952.
3. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. М. : Энергия, 1973.
4. Фокин В.М. Теоретические основы оптимизации теплотехнических характеристик ограждающих конструкций. Волгоград, 2003. 128 с.

© Фокин В.М., Лепилов В.И., 2006